第40卷 第7期
2023年7月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

1951—2020年疏勒河流域气温时空变化特征

王士维， 孙栋元， 周 敏， 王亦可， 王祥镔，
季宗虎， 张文睿， 武兰珍

（甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 基于疏勒河流域敦煌站、瓜州站和玉门站1951—2020年气温实测数据，采用线性倾向、累计距平、Mann-Kendall检验等方法，分析各站气温时空变化特征。结果表明：(1) 疏勒河流域各站平均气温均呈显著上升趋势，倾向率排序表现为：敦煌站（0.244 ℃·$(10a)^{-1}$，$P<0.05$）>瓜州站（0.209 ℃·$(10a)^{-1}$，$P<0.05$）>玉门站（0.195 ℃·$(10a)^{-1}$，$P<0.05$）。(2) 敦煌站、玉门站四季平均气温呈显著上升趋势；瓜州站春季、秋季、冬季平均气温呈显著上升趋势，夏季平均气温呈不显著上升趋势。(3) 疏勒河流域 各站平均气温突变年份分别为1998年、1997年和1995年；第一主周期分别为58 a、30 a、13 a。(4) 疏勒河流域全年及四季平均气温从东向西逐渐升高，不均匀系数和集中度均呈下降趋势。

关键词： 气温；时空变化；M-K检验；Morlet小波分析；疏勒河流域

21世纪以来，随着全球气候变暖，我国呈现出明显的暖干化趋势。近100 a中国平均地表温度上升约0.5~0.8 ℃，尤其以西北干旱半干旱地区的变化比较显著[1-2]。气候变化将改变流域内水文、气象因子在时间和空间上的分布现状，从而引起水资源在时空上的重新分配，进而对流域水资源供需、生态环境和社会经济等造成严重危害。疏勒河流域地处甘肃河西内陆区，是甘肃省内陆三大主要河流之一，也是河西的主要产粮区之一。疏勒河流域自然环境独特，生物种类单一，生态环境一旦遭到破坏，就难以恢复。因此，对流域气温时空变化特征进行研究，更清楚的了解流域气温动态，对促进流域生态建设具有重要意义。近年来，疏勒河流域气温变化问题受到许多学者和各级政府的广泛关注，并展开了一系列研究。结果表明：以气温上升为主要特征的气候变化已经对疏勒河流域水资源及生态环境产生了显著影响，总体表现为植被耗水量增加[3-4]、生态承载力和需水量增大[5-7]、植被退化[8]、冻土环境退化[9-10]、流域降水、径流呈上升趋势[11-18]，流域气温显著上升[19-22]，而在未来温度持续变暖的情景下，疏勒河流域可能面临的生态威胁也会越来越大[20]。综上所述，以往对疏勒河流域气温变化特征的研究取得了一些有意义的成果，但大多集中在气候变化产生的影响，而关于疏勒河流域气温时空变化的研究相对较少。因此，本文基于疏勒河流域敦煌站、瓜州站和玉门站1951—2020年实测气温资料，系统地分析疏勒河流域近70 a年平均气温时空变化特征，更加全面地认识区域气候变化的基本事实，以期为保护疏勒河流域生态环境及促进流域社会经济-生态-水资源协调发展提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

疏勒河是甘肃省河西内陆第二大河，地理位置位于92°11′~98°30′E，38°00′~42°48′N，流域面积为4.13×10^4 km^2（图1），流域多年平均气温6.98~

收稿日期：2023-03-27； 修订日期：2023-05-05
基金项目：甘肃省高等学校青年博士基金项目（2022QB-070）；甘肃农业大学科技创新基金—青年导师扶持基金项目（GAU-QDFC-2021-16）；甘肃省重点研发计划项目（21YF5NA015）；甘肃省青年科技基金计划项目（21JR7RA854）；甘肃省水利厅水资源费项目（23GSLK092）
作者简介：王士维（1998-），男，硕士研究生，研究方向为智慧水利与水资源. E-mail: 2914561776@qq.com
通讯作者：孙栋元. E-mail: sundy@gsau.edu.cn

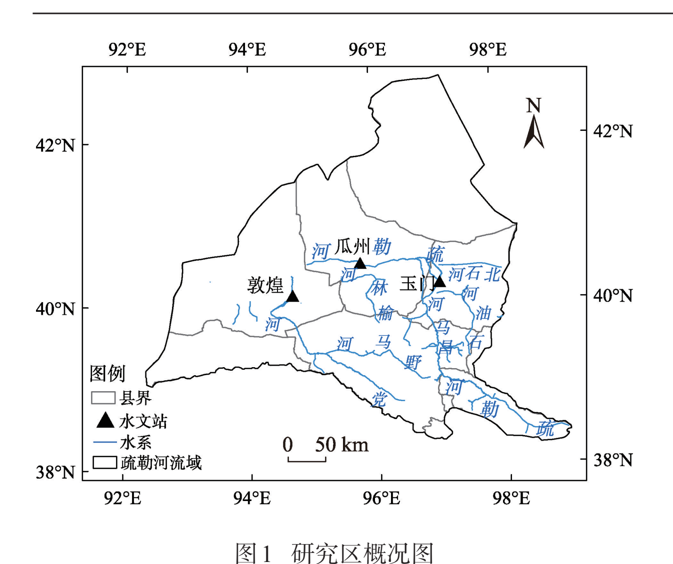


图1 研究区概况图

Fig. 1 Map of study area

9.82 ℃[18]，年降水量40.2~57.5 mm，年蒸发量2577.4~2653.2 mm[23]。流域降水量稀少，地表蒸发量极大，属大陆性干旱气候，是我国极度干旱地区之一。

1.2 数据来源与研究方法

选取疏勒河流域敦煌(1951—2020年)、瓜州(1951—2020年)和玉门(1953—2020年)3个气象站的逐月、逐年气温数据作为基础资料，所有数据均来自甘肃省气象局。通过各站点气温数据进一步研究流域气温变化特征。根据数据资料，将季节划分为：3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，12月—次年2月为冬季。

通过线性倾向法[24]分析气温年、季变化趋势。通过5 a滑动平均曲线，来判断气温变化波动呈上升或下降趋势。通过累计距平法[25]，分析气温升降变化过程。采用P值(P-value)[26]对气候倾向率进行显著性检验。利用Mann-Kendall突变检验法[24]分析气温的突变特征。运用Morlet小波[24]分析法分析气温的周期性特征。使用ArcGIS软件分析研究区气温的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 气温年际变化特征

敦煌站1951—2020年多年平均气温为9.77 ℃，整体呈上升趋势，70 a内气温增加了1.708 ℃，增温趋势显著。从5 a滑动平均曲线可以看出(图2a)，平均气温呈现缓慢增加-减小-增加的波动变化趋势，呈现多段上升-下降-上升的变化过程。由图2d

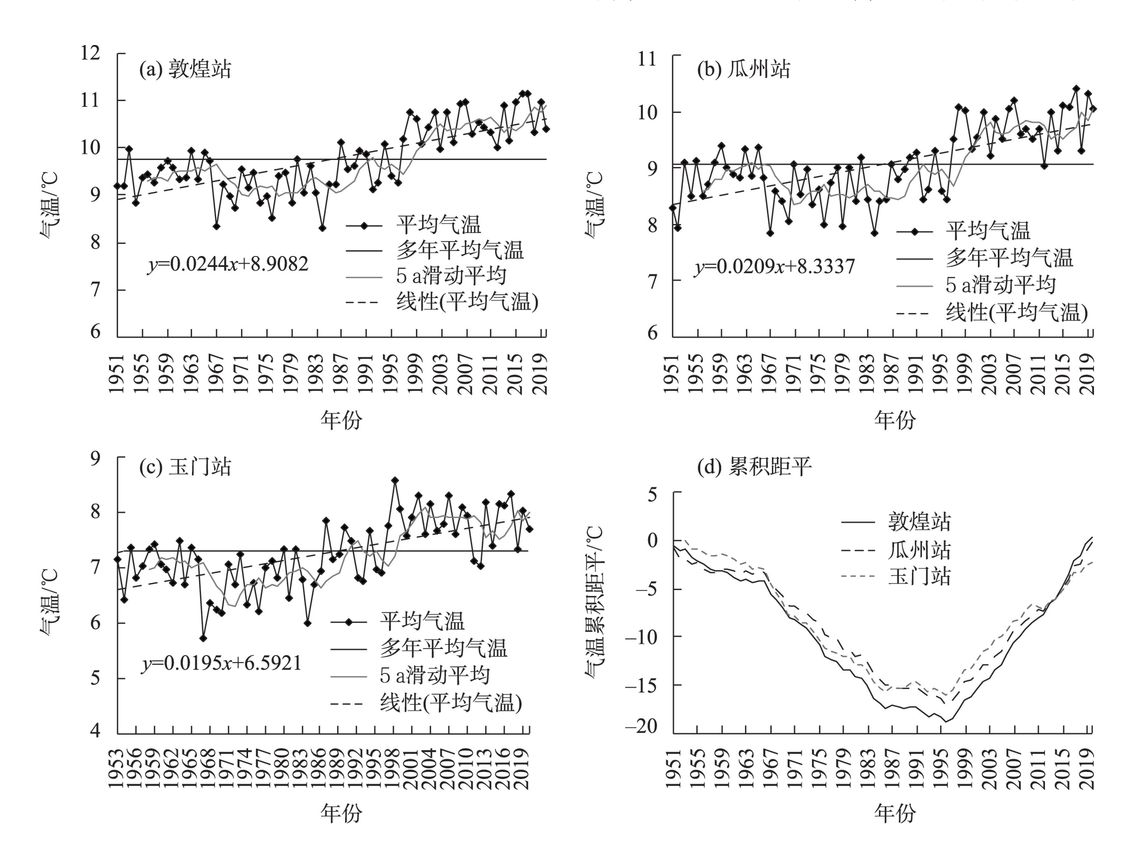


图2 疏勒河流域气温年际变化与累积距平变化

Fig. 2 Interannual variation and cumulative anomaly variation of temperature in Shule River Basin

累积距平可知，敦煌站平均气温呈现两个时段升降变化过程，1951—1996年呈现下降趋势，1997—2020年呈现上升趋势。

瓜州站1951—2020年多年平均气温为9.08 ℃，整体呈上升趋势，70 a内气温上升1.463 ℃，增温趋势显著。从5 a滑动平均曲线可以看出（图2b），平均气温呈现缓慢增加-减小-增加的波动变化趋势，呈现多段上升-下降-上升的变化过程。由图2d累积距平可知，瓜州站平均气温呈现两个时段升降变化过程，1951—1996年呈现下降趋势，1997—2020年呈现上升趋势。

玉门站1953—2020年多年平均气温为7.30 ℃，整体呈上升趋势，68 a内气温上升1.326 ℃，增温趋势显著。从5 a滑动平均曲线可以看出（图2c），平均气温呈现缓慢减小-增加-减小的波动变化趋势，呈现多段下降-上升-下降变化过程。由图2d累积距平可知，玉门站平均气温呈现两个时段升降变化过程，1953—1996年呈现下降趋势，1997—2020年呈现上升趋势。

2.2 气温季节变化特征

由图3可以看出，敦煌站四季平均气温均呈显著上升趋势，其中，春季平均气温趋势率最大，达到0.328 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），其次是冬季，为0.268 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），再次是夏季，为0.191 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），秋季平均气温趋势率最小，为0.188 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$）。

由图4可以看出，瓜州站春季、秋季、冬季平均气温呈显著上升趋势，夏季平均气温呈不显著上升趋势。其中，冬季平均气温趋势率最大，达到0.308 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），其次是春季，为0.299 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），再次是秋季，为0.152 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），夏季平均气温趋势率最小，为0.077 ℃·$(10a)^{-1}$（$P>0.05$）。

由图5可以看出，玉门站四季平均气温均呈显著上升趋势，其中春季平均气温趋势率最大，达到0.233 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），其次是冬季，为0.207 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），再次是秋季，为0.179 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$），夏季平均气温趋势率最小，为0.165 ℃·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$）。

2.3 气温突变性特征

图6a为疏勒河流域敦煌站1951—2020年平均气温M-K突变检验曲线，根据UF_k曲线可知，1953—

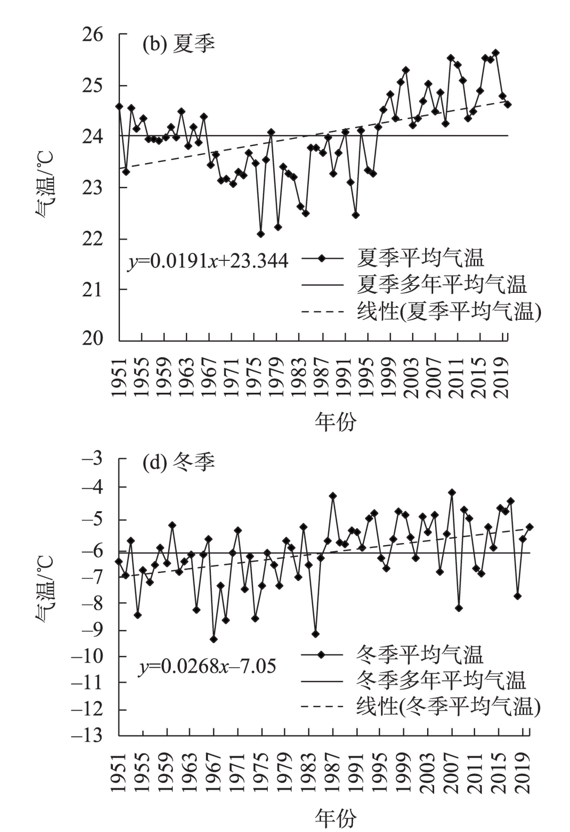


图3　敦煌站平均气温季节变化

Fig. 3　Seasonal variation of average temperature at Dunhuang station

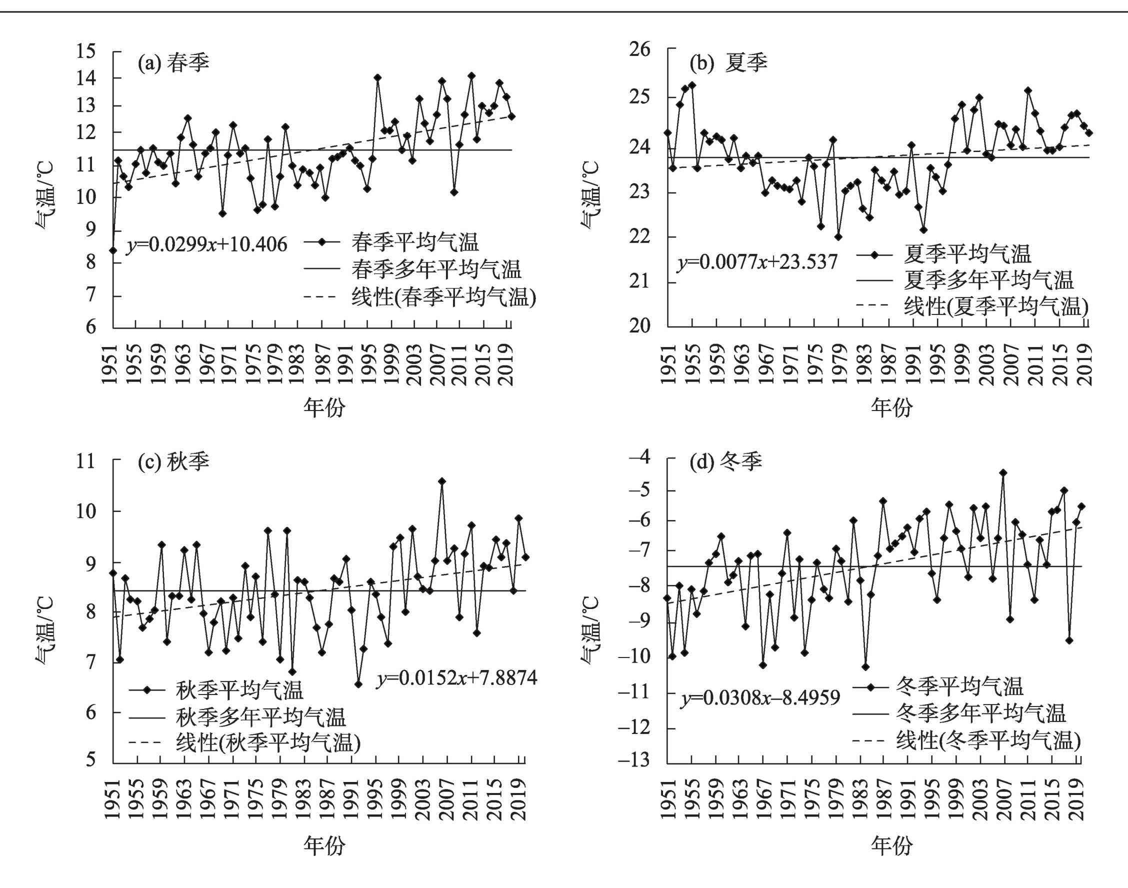


图4 瓜州站平均气温季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of average temperature in Guazhou station

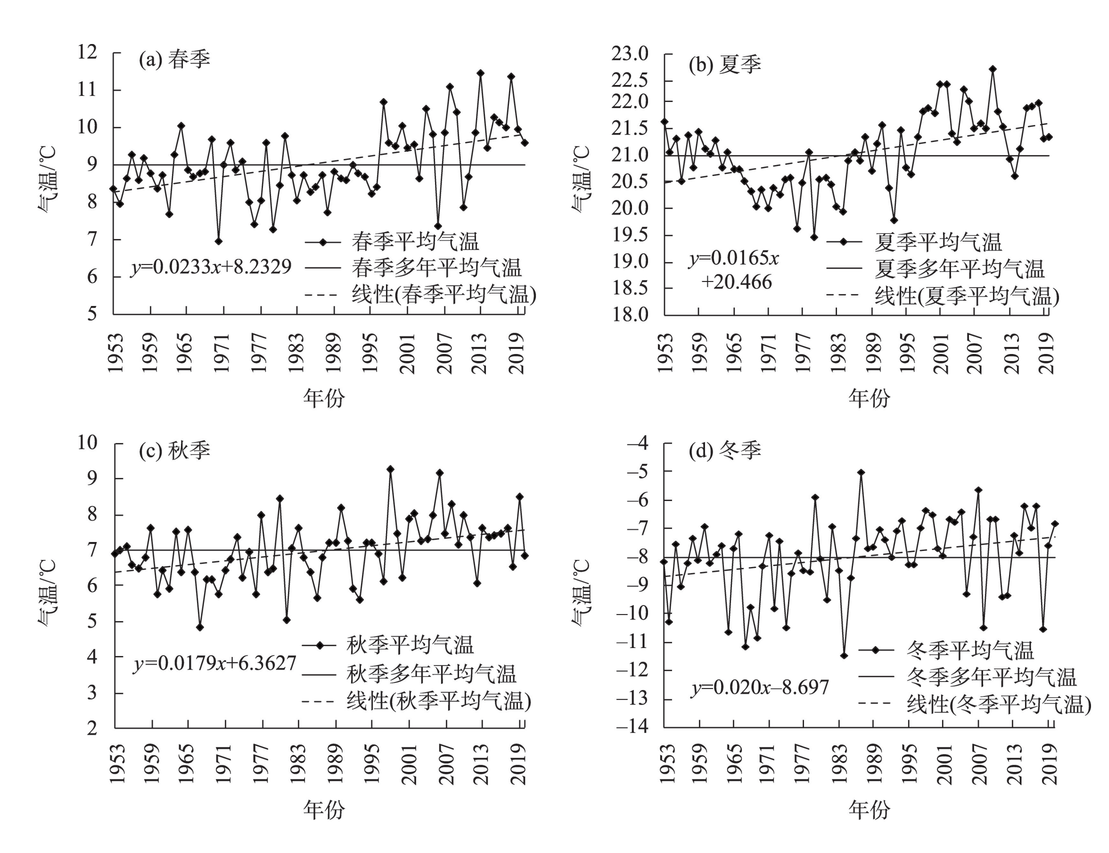
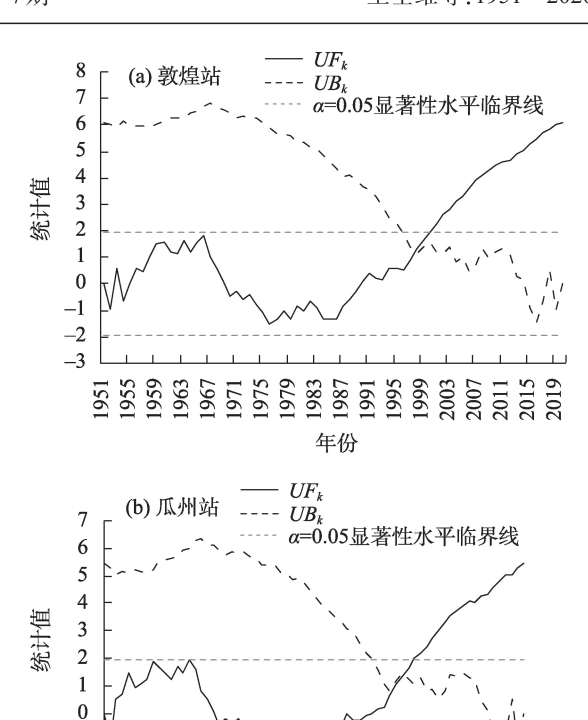


图5 玉门站平均气温季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of average temperature in Yumen station



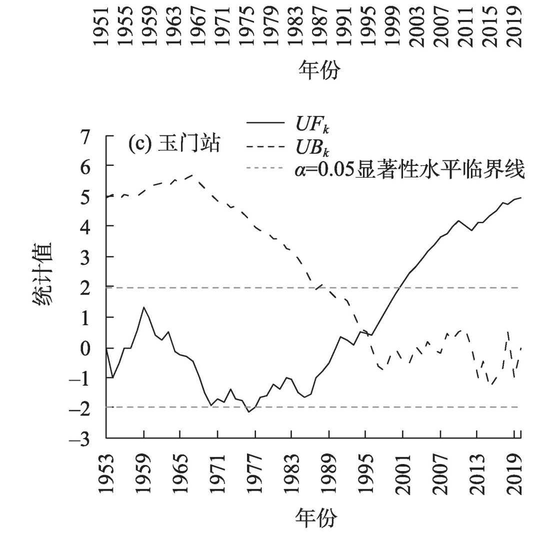


图6　疏勒河流域平均气温M-K突变检验

Fig. 6　M-K mutation test of average temperature in Shule River Basin

1954年、1956—1969年、1990—2020年呈上升趋势，1970—1989年呈下降趋势，其中2001—2020年超过95%置信水平曲线，甚至超过99%置信水平曲线，说明上升趋势十分显著。UF_k和UB_k曲线主要相交于1998年，且交点在临界线±1.96之间，表明平均气温在1998年发生突变，1998年为突变点。

图6b为疏勒河流域瓜州站1951—2020年平均气温M-K突变检验曲线，根据UF_k曲线可知，1953—1969年、1996—2020年呈上升趋势，1970—1994年呈下降趋势，其中2002—2020年超过95%置信水平曲线，甚至超过99%置信水平曲线，说明上升趋势十分显著。UF_k和UB_k曲线主要相交于1997年，且交点在临界线±1.96之间，表明平均气温在1997年发生突变，1997年为突变点。

图6c为疏勒河流域玉门站1953—2020年平均气温M-K突变检验曲线，根据UF_k曲线可知，1958—1963年、1991—2020年呈上升趋势，1964—1990年呈下降趋势，其中2001—2020年超过95%置信水平曲线，甚至超过99%置信水平曲线，说明上升趋势十分显著。UF_k和UB_k曲线主要相交于1995年，且交点在临界线±1.96之间，表明平均气温在1995年发生突变，1995年为突变点。

2.4　气温周期性特征

由图7a～图7b可以看出，敦煌站平均气温小波实部图主要存在3~8 a、10~15 a、25~30 a、45~50 a和55~60 a五个特征时间尺度。小波方差图表明平均气温存在五个明显的峰值。其中，第一主周期为58 a，第二主周期为47 a，第三主周期为12 a，第四主周期为29 a，第五主周期为5 a。

由图7c～图7d可知，瓜州站平均气温小波实部图主要存在5~10 a、10~15 a、28~33 a、和50~55 a四个特征时间尺度，小波方差图表明平均气温存在四个明显的峰值。其中，第一主周期为30 a，第二主周期为52 a，第三主周期为13 a，第四主周期为7 a。

由图7e～图7f可知，玉门站平均气温小波实部图主要存在25~30 a、20~25 a、10~15 a和5~10 a四个特征时间尺度，小波方差图表明平均气温存在四个明显的峰值。其中，第一主周期为13 a，第二主周期为22 a，第三主周期为29 a，第四主周期为6 a。

2.5　气温空间变化特征

由图8可以看出，疏勒河流域全年及四季平均气温均表现为敦煌站>瓜州站>玉门站，平均气温呈自东向西逐渐升高的趋势。由于敦煌站和瓜州站为中部盆地区域，所处位置海拔高度较低，尤其敦煌市与沙漠接壤，干旱少雨，所以高温日数较多。玉门站处于北部川区，纬度和海拔高度都较高，气温常年偏低，低温日数较多。

2.6　气温不均匀性与集中度变化分析

敦煌站1951—2020年平均气温不均匀系数的变化范围在0.45~0.69，平均值为0.54，最大值为0.69，出现在1967年，最小值为0.45，出现在2015

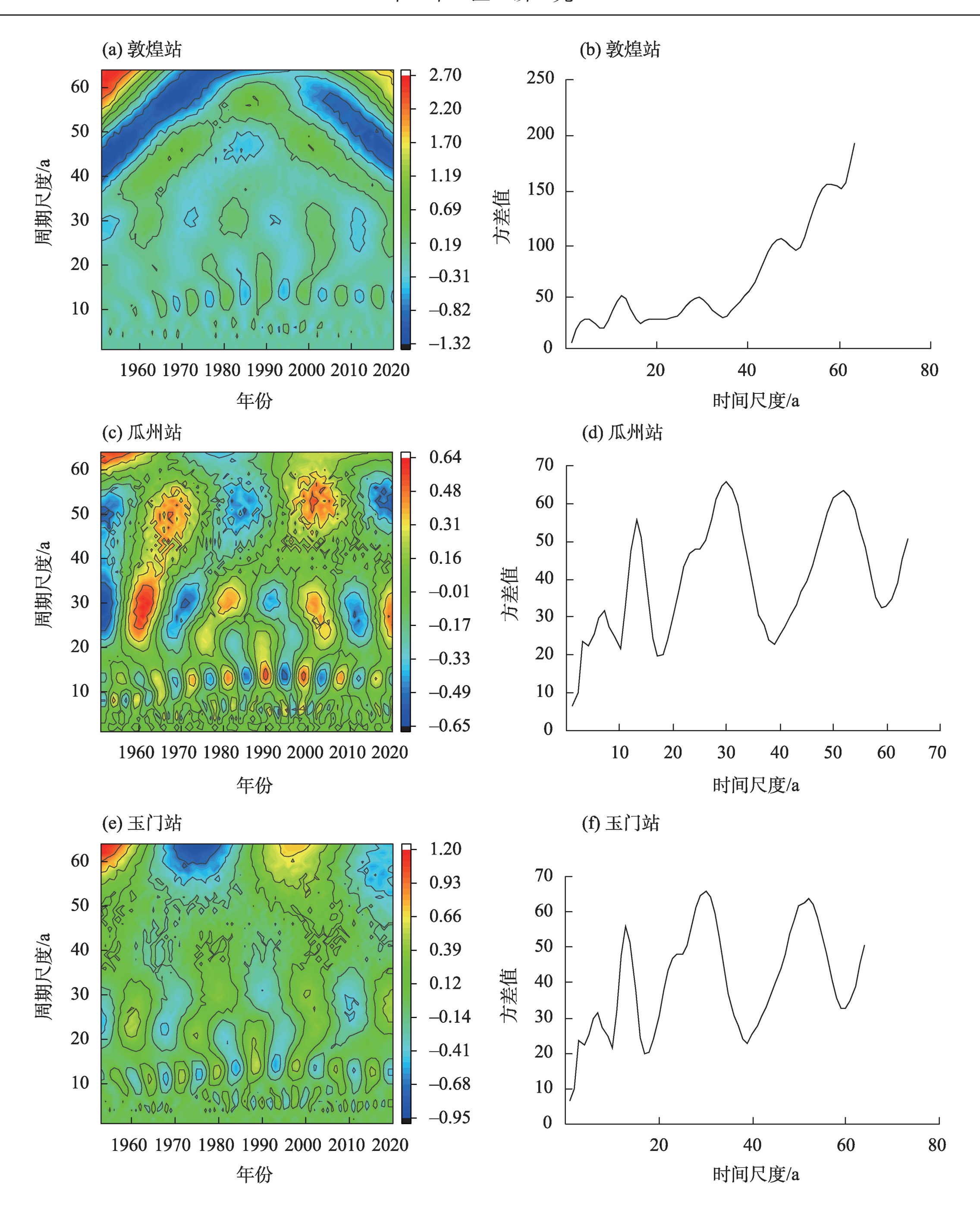


图7 疏勒河流域平均气温周期性分析

Fig. 7 Periodic analysis of annual average temperature in Shule River Basin

年，平均气温不均匀系数呈微弱减小趋势，倾向率为−0.015·(10a)$^{-1}$。平均气温集中度的变化范围在0.72~1.08，平均值为0.85，最大值为1.08，出现在1967年，最小值为0.72，出现在2007年和2015年，平均气温集中度呈现微弱的下降趋势，倾向率为−0.023·(10a)$^{-1}$（图9a，图9b）。

瓜州站1951—2020年平均气温不均匀系数的变化范围在0.50~0.70，平均值为0.60，最大值为0.75，出现在1967年，最小值为0.50，出现在2015年和2017年，不均匀系数呈微弱减小趋势，倾向率为−0.018·(10a)$^{-1}$。平均气温集中度的变化范围在0.79~1.18，平均值为0.95，最大值为1.18，出现在1967年，最小值为0.79，出现在2007年，平均气温集中度呈现微弱的下降趋势，倾向率为−0.028·(10a)$^{-1}$（图9c，图9d）。

玉门站1953—2020年平均气温不均匀系数的变化范围在0.56~0.98，平均值为0.70，最大值为0.98，出现在1967年，最小值为0.56，出现在1998年

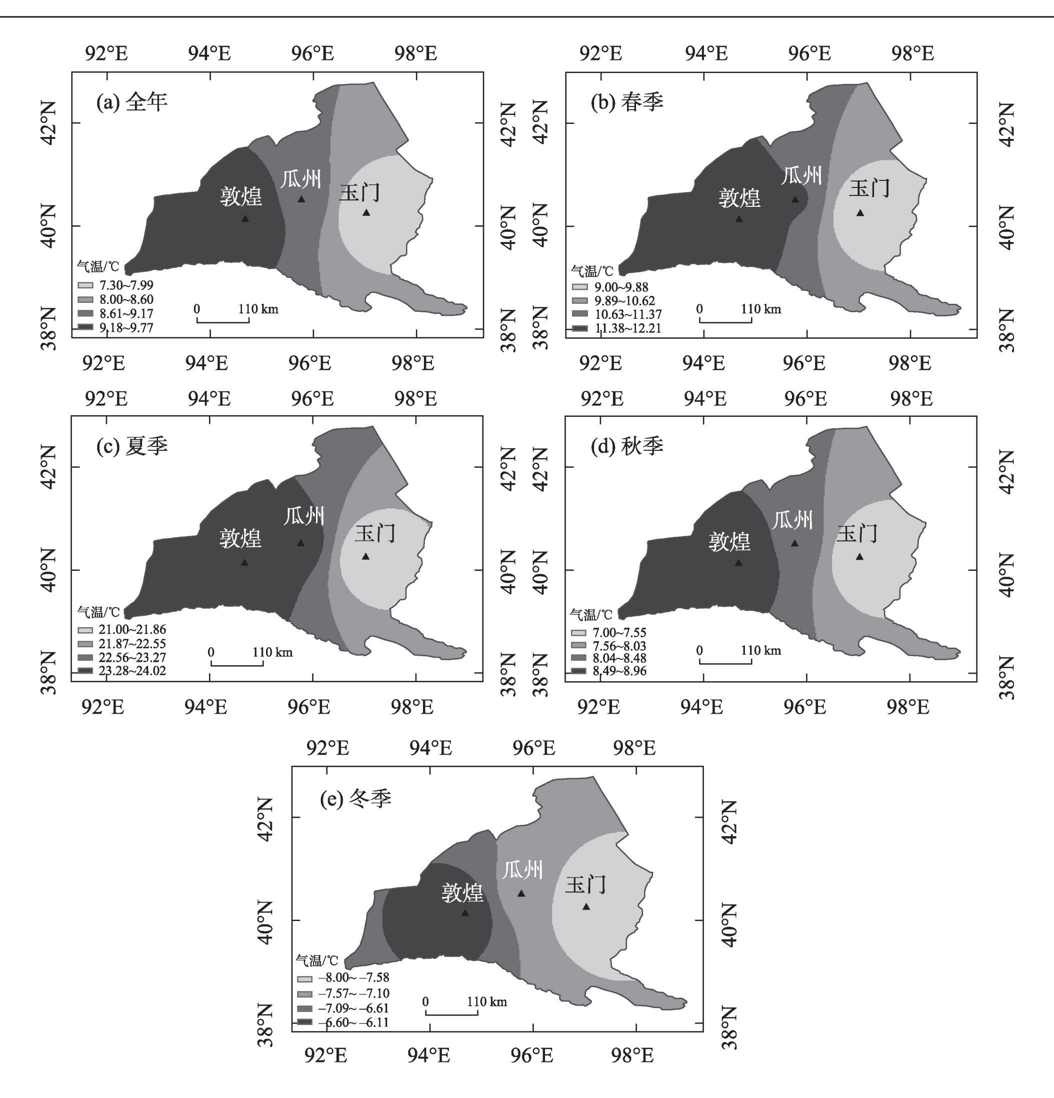


图8　疏勒河流域气温空间变化特征分析

Fig. 8　Analysis of spatial variation characteristics of temperature in Shule River Basin

和2002年，平均气温不均匀系数呈微弱减小趋势，倾向率为-0.02·(10a)$^{-1}$。平均气温集中度的变化范围在0.89~1.54，平均值为0.89，最大值为1.54，出现在1967年，最小值为0.89，出现在1998年，平均气温集中度呈现微弱的下降趋势，倾向率为-0.032·(10a)$^{-1}$（图9e，图9f）。疏勒河流域各站气温不均匀系数与集中度均呈现下降趋势，表明流域气温分布趋于均匀化。

3　讨论

研究时段内疏勒河流域全年及四季平均气温均呈现上升趋势，这与以往的研究结果一致[19]。流域平均气温增温率为0.21 ℃·(10a)$^{-1}$，这与多位学者对该地区的研究结果相近[27-29]。其中，春、冬季增温率较大，对年平均气温升高贡献突出，而夏、秋季增温率较小，这与人类活动导致温室气体排放量增加有关[1]。与夏、秋季相比，在春、冬季节流域居民主要靠燃煤取暖，温室气体浓度增加、大气辐射保温作用增强导致春、冬季增温率最高。流域敦煌站、瓜州站、玉门站平均气温在1997年左右均出现了明显的突变点，且都是呈现正突变，这可能是受西风环流降水的影响，疏勒河流域的气候环境由冷干转为暖湿[22]。流域气温周期性特征存在较大差异性，这与研究时间序列、气候因素和人类活动有很大关系。疏勒河流域东部毗邻山川，纬度和海拔高度较高，气温常年偏低，越往西越接近沙漠地带，气温较高，所以气温空间变化呈现由东向西升高的趋势。流域气温不均匀系数与集中度均呈下降趋势，表明气温分布趋于均匀化，高、低温出现的不确定性可能升高。总体而言，由于西北干旱内陆河流域气候特点的复杂性，气温受多种因素综合影响，其变化特征时空差异很大。因此，在后续研究中应进一步加强环境变

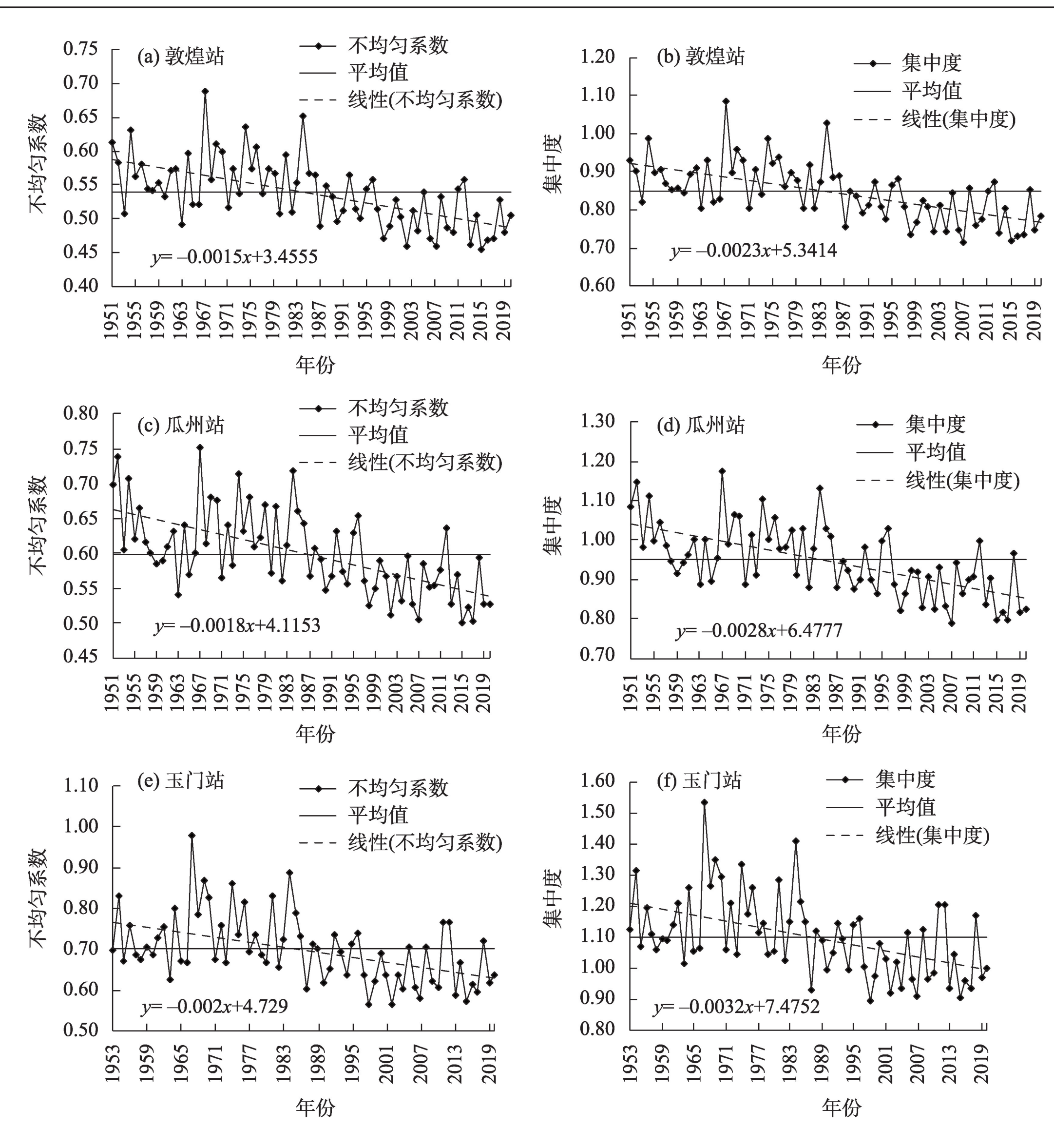


图9 疏勒河流域年平均气温不均匀性和集中度变化

Fig. 9 The variation of annual average temperature inhomogeneity and concentration in Shule River Basin

化下区域气温时空变化特征与预测研究。

4 结论

本研究基于疏勒河流域敦煌站、瓜州站、玉门站1951—2020年全年及四季气温数据，研究流域气温时空变化特征，结论如下：

（1）疏勒河流域敦煌站、瓜州站、玉门站年均气温分别以0.244 ℃·$(10a)^{-1}$(P<0.05)、0.209 ℃·$(10a)^{-1}$(P<0.05)、0.195 ℃·$(10a)^{-1}$(P<0.05)的速率增加，70 a、70 a、68 a内分别增加了1.708 ℃、1.463 ℃、1.326 ℃，增温趋势显著。

（2）敦煌站、玉门站四季平均气温呈显著上升趋势；瓜州站春季、秋季、冬季平均气温呈显著上升趋势，夏季平均气温呈不显著上升趋势。从空间分布来看，流域全年及四季平均气温从东向西逐渐升高，高温多集中在敦煌站。

（3）疏勒河流域各站平均气温均在90年代发生突变，敦煌站、瓜州站、玉门站平均气温突变年份分别为1998年、1997年和1995年。流域气温周期特征差异性较大，敦煌站、瓜州站和玉门站平均气温第一主周期分别为58 a、30 a、13 a。流域气温不均匀系数与集中度均呈递减趋势。

参考文献(References)：

[1] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1):

3-8. [Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend[J]. Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8.]

[2] 王鹏祥, 杨金虎, 张强, 等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 649-656. [Wang Pengxiang, Yang Jinhu, Zhang Qiang, et al. Climate change characteristic of Northwest China in recent half century[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(6): 649-656.]

[3] 李曼, 王妞妞, 刘焕才. 疏勒河中下游地区植被生态需水量时空变化研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 97-102. [Li Man, Wang Niuniu, Liu Huancai. Study on temporal-spatial variation of vegetation ecological water demand in the middle and lower reaches of Shule River[J]. Yellow River, 2021, 43(11): 97-102.]

[4] 魏乐民, 郑续, 郭建军, 等. 基于改进彭曼公式法的疏勒河流域植被耗水时空分布研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1416-1426. [Wei Lemin, Zheng Xu, Guo Jianjun, et al. Spatial and temporal distribution of vegetation water consumption in Shule River Basin based on improved penman formula method[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1416-1426.]

[5] 辛永君, 周冬梅, 金银丽, 等. 疏勒河流域生态承载力时空演变特征及驱动力研究[J]. 遥感信息, 2021, 36(6): 18-26. [Xin Yongjun, Zhou Dongmei, Jin Yinli, et al. Spatiotemporal evolution characteristics and driving forces of ecological carrying capacity in Shule River Basin[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(6): 18-26.]

[6] 岳东霞, 陈冠光, 朱敏翔, 等. 近20年疏勒河流域生态承载力和生态需水研究[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5178-5187. [Yue Dongxia, Chen Guanguang, Zhu Minxiang, et al. Biocapacity and ecological water demand in Shule River Basin over the past 20 Years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5178-5187.]

[7] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J]. 草业学报, 2012, 21(4): 267-274. [Zhang Jun, Zhang Renzhi, Zhou Dongmei. Ecological water resources carrying capacity of Shule River Basin based on ecological footprint method [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(4): 267-274.]

[8] 周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 等. 疏勒河流域气候变化和人类活动对植被NPP的相对影响评价[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5127-5137. [Zhou Yanyan, Zhu Minxiang, Guo Xiaojuan, et al. Relative effects of climate change and human activities on net primary productivity in Shule River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (14): 5127-5137.]

[9] 吴吉春, 盛煜, 李静, 等. 疏勒河源区的多年冻土[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 571-580. [Wu Jichun, Sheng Yu, Li Jing, et al. Permafrost in source areas of Shule River in Qilian Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 571-580.]

[10] 牛丽, 叶柏生, 李静, 等. 中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 85-92. [Niu Li, Ye Baisheng, Li Jing, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in western China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(1): 85-92.]

[11] 王学良, 陈仁升, 刘俊峰, 等. 1956—2021年疏勒河流域主要河流出山径流变化及成因分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1782-1792. [Wang Xueliang, Chen Rensheng, Liu Junfeng, et al. Changes in runoff from major rivers and analysis of its causes in the Shule River Basin from 1956 to 2021[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1782-1792.]

[12] 李雅培. 气候变化背景下疏勒河流域出山径流模拟与预测研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021. [Li Yapei. Simulation and Prediction of the Mountainous Runoff in the Shule River Basin under Climate Change[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.]

[13] 贾玲, 张百祖, 牛最荣, 等. 疏勒河上游径流变化与预测分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1588-1597. [Jia Ling, Zhang Baizu, Niu Zuirong, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (5): 1588-1597.]

[14] 孙美平, 张磊, 姚晓军, 等. 1954—2016年疏勒河上游径流变化特征及影响因素[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 657-666. [Sun Meiping, Zhang Lei, Yao Xiaojun, et al. Characteristics and influencing factors of runoff changes in the upper Shule River Basin from 1954 to 2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44 (2): 657-666.]

[15] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 907-917. [Li Hongyuan, Zhao Qiudong, Wu Jinkui, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of Shule River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41 (4): 907-917.]

[16] 杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958—2015年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1894-1899. [Yang Chunli, Lan Yongchao, Wang Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River Basin in 1958-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(12): 1894-1899.]

[17] 李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 803-810. [Li Jisheng, Hu Xinglin, Huang Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River Basin, Hexi Corridor[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 803-810.]

[18] 孙栋元, 齐广平, 鄢继选, 等. 疏勒河干流降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 291-303. [Sun Dongyuan, Qi Guangping, Yan Jixuan, et al. Research on variation characteristics of precipitation in the mainstream of Shule River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 291-303.]

[19] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊57年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1482-1492. [Meng Xiujing, Zhang Shifeng, Zhang Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1482-1492.]

[20] 李雅培, 朱睿, 刘涛, 等. 基于BCC-CSM2-MR模式的疏勒河流

域未来气温降水变化趋势分析[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 535-546. [Li Yapei, Zhu Rui, Liu Tao, et al. Trend analysis of future temperature and precipitation in Shule River Basin based on BCC-CSM2-MR model[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 535-546.]

[21] 贾玲, 孙栋元, 牛最荣, 等. 疏勒河流域最高、最低气温变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 281-287. [Jia Ling, Sun Dongyuan, Niu Zuirong, et al. Pattern of maximum and minimum temperature variation in Shule River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 281-287.]

[22] 张鹏, 张钰, 罗颖, 等. 疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 165-172. [Zhang Peng, Zhang Yu, Luo Ying, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule River to climate change of upstream[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 165-172.]

[23] 程玉菲, 程文举, 胡想全, 等. 疏勒河流域极端水文事件对极端气候的响应[J]. 高原气象, 2019, 38(3): 583-592. [Cheng Yufei, Cheng Wenju, Hu Xiangquan, et al. Response of extreme hydrological events to extreme climate in the Shule River Basin[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(3): 583-592.]

[24] 李朝月, 崔鹏, 郝建盛, 等. 1960年以来藏东南地区气温和降水的变化特征[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 344-358. [Li Chaoyue, Cui Peng, Hao Jiansheng, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation over the southeastern Xizang since 1960[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(2): 344-358.]

[25] 沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244-250. [Shen Yongping, Liu Shiyin, Zhen Lili, et al. Fluctuation of glacier material balance in the north slope of Qilian Mountains and its impact on water resources in Hexi[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 244-250.]

[26] 高娟. 假设检验中*P*值的深入分析[J]. 统计理论与实践, 2021, 2(6): 17-19. [Gao Juan. In depth analysis of *P* value in hypothesis testing[J]. Statistical Theory and Practice, 2021, 2(6): 17-19.]

[27] 王劲松, 费晓玲, 魏锋. 中国西北近50a来气温变化特征的进一步研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 724-732. [Wang Jinsong, Fei Xiaoling, Wei Feng. Further study of temperature change in Northwest China in recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(4): 724-732.]

[28] 任朝霞, 杨达源. 近50 a西北干旱区气温分区及其变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(1): 99-103. [Ren Zhaoxia, Yang Dayuan. Climate change trends of northwest arid area in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(1): 99-103.]

[29] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近54年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717-727. [Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziying, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951-2004[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 717-727.]

Temporal and spatial variation of temperature in the Shule River Basin from 1951 to 2020

WANG Shiwei, SUN Dongyuan, ZHOU Min, WANG Yike, WANG Xiangbin, JI Zonghu, ZHANG Wenrui, WU Lanzhen

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The linear tendency, cumulative anomaly, and Mann-Kendall test were used to analyze the temporal and spatial variation of temperature in Dunhuang, Guazhou, and Yumen stations in the Shule River Basin from 1951 to 2020. The results revealed that (1) all stations experienced a significant upward trend in average temperature, with tendency rates of 0.244 °C·$(10a)^{-1}$ ($P<0.05$) for Dunhuang station, 0.209 °C·$(10a)^{-1}$ ($P<0.05$) for Guazhou station, and 0.195 °C·$(10a)^{-1}$ ($P<0.05$) for Yumen station. (2) Dunhuang and Yumen stations exhibited a significant upward trend in average temperature across all seasons, except for a nonsignificant upward trend in summer. (3) the mutation years for average temperature at Dunhuang, Guazhou, and Yumen stations were 1998, 1997, and 1995, respectively, with the first main cycles being 58 a, 30 a, and 13 a, respectively. (4) and annual and seasonal average temperatures gradually increased from east to west in the Shule River Basin, with decreasing nonuniformity coefficients and concentration degrees also observed.

Keywords: temperature; temporal and spatial changes; M-K test; Morlet wavelet analysis; Shule River Basin